

⑨ 日本国特許庁(JP)

⑩ 特許出願公開

⑫ 公開特許公報(A)

昭62-189057

⑬ Int. Cl.

識別記号

庁内整理番号

⑭ 公開 昭和62年(1987)8月18日

A 61 B 10/00
G 01 N 24/06
G 01 R 33/22

3 2 0

G-7437-4C
Y-7621-2G
Y-7621-2G

審査請求 有 発明の数 1 (全11頁)

⑮ 発明の名称 磁界勾配による渦電流を補償する方法

⑯ 特 願 昭61-306674

⑰ 出 願 昭61(1986)12月24日

優先権主張 ⑱ 1986年1月3日 ⑲ 米国(US) ⑳ 816074

⑳ 発 明 者 ガリイ・ハロルド・グ アメリカ合衆国、ウイスコンシン州、デラフィールド、バ
ローバー ツク・ベイ・ロード、824番
㉑ 発 明 者 ノーバート・ジョセ アメリカ合衆国、ウイスコンシン州、ワウワトサ、マウン
フ・ペルク テン・アベニュー、1641番
㉒ 出 願 人 ゼネラル・エレクトリ アメリカ合衆国、12305、ニューヨーク州、スケネクタデ
ック・カンパニイ イ、リバーロード、1番
㉓ 代 理 人 弁理士 生沼 徳二

明 細 書

1. 発明の名称

磁界勾配による渦電流を補償する方法

2. 特許請求の範囲

磁界勾配による渦電流を補償する方法に於て、(a) NMR 動作サンプルを MR 走査器のアイソセントラから離して位置ざめし、(b) 前記サンプルの少なくとも1つの次元の軸線に沿って勾配パルスを印加し、(c) 該勾配パルスを印加してから予定の時間内に前記サンプルに RF 励振パルスを照射して NMR 信号を発生させ、(d) 前記勾配パルスを印加してからの合計時間の関数として前記 NMR 信号の位相を測定し、(e) 測定された位相を前記勾配のインパルス応答に対して関係づけ、(f) 該インパルス応答を用いて、磁界勾配による渦電流を補償する工程を含む方法。

3. 発明の詳細な説明

発明の背景

本発明は磁気共鳴(MR)技術に関する。
更に具体的に云えば、本発明は、好ましい態様で

は、MR 磁界勾配による渦電流の補償フィルタの校正方法に関する。本発明は磁気共鳴作像法に用いることが出来るが、その場合に制限されない。

磁気共鳴現象は、従来、化学的な組成物の構造を解析する為に、構造化学者によつて分解能の高い磁気共鳴分光装置に利用されて来た。最近、解剖学的な部分の作像と、生体内の非侵入形の分光解析を行なう用途を持つ様な医療用の診断モードの MR 技術が開発された。現在ではよく知られているが、MR 現象は、均質な分極磁界 B_0 の中に配置された患者の様なサンプル物体をラーモア周波数の無線周波(RF)エネルギーで照射することにより、この物体内に MR 現象を励振すること出来る。医療用の診断の用途では、この為に検査すべき患者を、円筒形の RF コイルの場の中に位置ざめし、RF 電力増幅器を用いて RF コイルを付勢するのが典型的である。RF 励振が止むと、同じコイル又は異なる RF コイルを用いて、大抵はスピン・エコーの形で、RF コイルの場の中にある患者の容積から出る MR 信号を検出する。

完全な MR 走査の過程では、複数の MR 信号を観測するのが典型的である。こういう信号を使って、検査する物体に関する MR 作像情報又は分光情報を導き出す。

作像（イメージング）に磁気共鳴を用いるには、NMR 信号の中に空間情報を符号化する為に磁界勾配を使わなければならない。理想的な勾配の挙動からのずれが、像の歪みを持ち込むと予想される。例えば、選択的な時間反転パルス順序（即ち、 180° 時間反転 RF パルスを使うこと）の間、勾配が一定でない場合、核スピンの不完全な位相戻し（rephasing）並びにそれに伴う信号の損失が起る。この影響が、多重エコー（カー・パーソル・メーブーム・ギル（Carr-Purcell-Meiboom-Gill））順序の後続のスピンのエコーで倍加する。更に、勾配磁界がゼロであるべき時に（例えば前の勾配パルスからの残留減衰のために）ゼロでない場合、予期しなかつた位相分散により、化学シフト作像（CSI）順序のスペクトルの歪み並びに多重エコー順序に於けるスピンス

ければならない。測定方式を使つて、補正されていない残留勾配磁界を標本化し、そのデータの解析から、ポテンショメータの設定値を計算する。また、計算機によつて、所望の電流パルスの形を発生するという様に、プリエンファシス形フィルタ以外の方式によつて、電流パルスを整形する様なこの他の形式が考えられている。

従つて、本発明の目的は、補正されていない磁界を測定し、この情報を使つて勾配の歪みを補償する方法を提供することである。

本発明の別の目的は、勾配応答を測定するのに NMR を用い、感度を改善した改良された方法を提供することである。

本発明の別の目的は、まとまつた勾配の経過全体を反映する自由誘導減衰（FID）信号を監視することにより、勾配応答を測定する NMR 方法を提供することである。

発明の要約

時間依存性を持つ擬似的な磁界勾配応答を特徴づけると共に、それに対して補償する方法を提

ピン緩和時間（ T_2 ）の決定の不正確さを招くことがある。

こういう勾配の歪みは、磁石、その恒温層（磁石が超導電型の場合）又はシム・コイル装置、或いは勾配コイルを RF コイルから波結合する為に使われる RF 遮蔽体内の損失性構造に勾配磁界が結合される場合に起り得る。擬似的な応答成分が、周囲の構造に電流を誘起すること、並びに／又はシム・コイルにエネルギーが失われることによつて起り、多重区画の緩和挙動となつて現われる。例えば、勾配コイルに矩形電流パルスを印加する間並びにその後、夫々勾配磁界の大体指数関数形の上昇及び減衰が観測される。

／形式として、擬似勾配成分を減少する様に勾配コイルに印加される電流を整形する為に、勾配電源にアナログ・プリエンファシス形フィルタを使う方式が提案されている。このフィルタは多数の（例えば 2 個の）指数関数形減衰部品及び調節自在のポテンショメータ（例えば 4 個）を保持しており、装置を校正する際にこれらを設定した

供する。この方法では、小さなサンプル物体を、捕獲しようとする勾配がゼロでない装置アイソセンタから離して配置する。磁界勾配パルスをサンプルに印加した後、可変の時間後、 90° 無線周波パルスを印加する。この結果生ずる自由誘導減衰（FID）信号の位相を、勾配パルスの終りからの合計時間の関数として監視する。こういうデータを勾配パルス応答に関係づけ、回復方法によつて一組の指数関数（例えば 2 個又は 3 個）にはめ合せる。この時、／実施例では、初期評価点を中心としたテララ級数展開の 2 自乗最小化により、初期の評価を改善する。

本発明の新規と考えられる特徴は特許請求の範囲に具体的に記載してあるが、本発明自体の構成、作用及びその他の目的並びに利点は、以下図面について説明する所から最もよく理解されよう。

発明の詳しい説明

第 1 図には代表的な MR 装置の主な部品がブロック図で示されている。然し、これは装置の／例であつて、実際には本発明が装置に依存しな

いことに注意されたい。装置の全体的な制御が主計算機 101 (例えばデータ・ゼネラル社 MV 4000) を含む全体を 100 で示したホスト・コンピュータ・システムによつて制御される。計算機にはインターフェース 102 が付設されており、これを介して複数の計算機周辺装置及びその他の MR 装置の部品が結合されている。計算機周辺装置の中には磁気テープ駆動装置 104 があり、これは主計算機の指示の下に利用して、患者データ及び像をテープに記録することが出来る。処理済み患者データは像ディスク貯蔵装置 110 にも貯蔵することが出来る。データの予備処理及び像の構成の為に配列プロセッサ 106 を利用する。像プロセッサ 108 の機能は、拡大、像の比較及びグレースケールの調節の様な対話形の像表示の操作を行うことである。コンピュータ・システムが、ディスク・データ貯蔵装置 112 を用いて生の像データ (即ち像を再生する前のデータ) を貯蔵する手段を備えている。オペレータ・コンソール 116 もインターフェース 102 を介して計算機に

結合されていて、患者の検査に関するデータ、並びに走査の開始及び終了という様な MR 装置の適正な動作に必要なその他のデータを入力する手段をオペレータに提供する。オペレータ・コンソールは、ディスク又は磁気テープに貯蔵された像を表示する為にも使うことが出来る。

コンピュータ・システムが、システム制御装置 118 及び勾配増幅器装置 128 によつて、MR 装置に対して制御作用を加える。計算機が当業者によく知られた形で、(イーサネット回線の様な) デジタル通信回線 103 を介してシステム制御装置 118 と連絡する。システム制御装置がパルス制御モジュール (PCM) 120、無線周波トランシーバ 122、状態制御モジュール (SMC) 124 及び部品を付勢するのに必要な全体を 126 で示した電源の様な幾つかの装置を含んでいる。PCM が計算機 101 によつて発生された制御信号を利用して、デジタルのタイミング信号、及び勾配コイルの付勢に使われる電流波形の様な制御信号、並びに RF パルスを変調する為にトランシーバで

使われる RF 包絡線波形を発生する。勾配波形が勾配増幅器装置 128 に印加される。この装置は全体的に G_x , G_y , G_z 増幅器 130, 132, 134 で構成されていて、各々が全体を 136 で示す勾配コイル集成体の中の対応する勾配コイルを付勢する為に用いられる。こういう勾配コイルは主磁石集成体 146 の一部分である。付勢された時、勾配コイルが、主磁界と同じ方向に、磁界の略一定の磁界勾配 G_x , G_y , G_z を発生し、これらの勾配はデカルト座標系の互いに直交する X, Y 及び Z 軸の方向である。即ち、主磁石 (図面に示していない) によつて発生された磁界が Z 軸方向であつて、これを B_0 と呼ぶことにし、Z 軸方向の合計磁界を B_z とすると、 $G_x = \partial B_z / \partial x$, $G_y = \partial B_z / \partial y$, $G_z = \partial B_z / \partial z$ であり、任意の点 (x, y, z) に於ける磁界は $B(x, y, z) = B_0 + G_x X + G_y Y + G_z Z$ で表わされる。 G_x 勾配は $x = 0$ の平面に対して何の影響もない。同様に、 G_y 及び G_z 勾配は夫々平面 $y = 0$ 及び $z = 0$ に対して何の影響もない。点 (0, 0, 0) を「アイ

ソセンタ」と呼ぶが、これはどの勾配も何の影響もない空間内の点である。アイソセンタは静磁界の容積の略中心にあるのが普通である。

勾配磁界が、トランシーバ 122、RF 増幅器 123 及び RF コイル 138 によつて発生された無線周波パルスと組合せて利用され、検査している患者の領域から出る MR 信号に空間情報を符号化する。パルス制御モジュール 120 によつて発生される波形及び制御信号が、RF 搬送波変調及び動作モードの制御、即ち送信モードか受信モードかの制御の為に、トランシーバ 122 で利用される。送信モードでは、送信機が制御信号に従つて変調された無線周波搬送波波形を RF 電力増幅器 123 に供給し、この増幅器が主磁石集成体 146 の中にある RF コイル 138 を付勢する。励振された原子核によつて放射された NMR 信号を送信に使つたのと同じ RF コイル又は異なる RF コイルによつて感知する。こういう信号をトランシーバの受信機部分で検出、増幅、復調、濾波及びデジタル化する。処理済みの信号が、インターフェ

ース102及びトランシーバ122を結合する専用の一方向高速デジタル・リンク105を介して、処理の為に主計算機に送られる。

PCM及びSCMは独立の装置であり、その何れも主計算機101、患者位置決め装置152の様な周辺装置、並びに相互にもリンク103を介して連絡する。PCM及びSCMは何れも16ビット・マイクロプロセッサ(例えばインテル8086)によつて構成され、主計算機からの指令を処理する。SCMが、患者揺台(図に示してない)の位置、及び可動の患者整合用扇形光ビーム(図に示してない)の位置に関する情報を収集する手段を含む。主計算機がこの情報を使つて、像の表示及び再生パラメータを修正する。SCMは患者輸送及び整合装置の作動という様な機能をも開始する。

勾配コイル集成体136及びRF送信/受信コイル138が、分極磁界を発生するのに使われる磁石の中孔の中に取付けられている。この磁石は主磁石集成体の一部分であり、この集成体は、患者整合装置148、シム・コイル電源140及び主磁

石電源142を含む。シム・コイル電源は主磁石に付設されたシム・コイルを付勢する為に利用される。シム・コイルは、分極磁界の非均質性を補正する為に使われる。抵抗性磁石の場合、主磁石電源142を用いて磁石を連続的に付勢する。超導型磁石の場合、この電源は磁石を適正な動作磁界にする為に用いられ、その後切離される。永久磁石の場合、電源142を必要としない。患者整合装置148が患者揺台及び輸送装置150並びに患者位置決め装置152と共に作用する。外部からの干渉を最小限に抑える為に、主磁石集成体146、勾配コイル集成体136、RF送信/受信コイル138及び患者取扱装置(148、150、152)で構成されたMR装置の部品は、全体を144で示すRF遮蔽室の中に入れられている。この遮蔽室は、一般的に室全体を取囲む銅又はアルミニウムの網目によつて構成される。この網目が装置によつて発生されたRF信号が出て行かない様にすると共に、室の外部で発生されたRF信号から装置を遮蔽する。動作周波数範囲では、約100 dbの

両方向減衰が典型的である。

第2A図には、 G_x 勾配を発生する為に勾配コイル12を付勢する勾配増幅器130(第1図にも示されている)が示されている。理想的な動作状態では、増幅器130に印加された矩形電流パルス14が波形16で示す様に増幅されて、勾配コイルを付勢するために使われた時、その結果として、略矩形の勾配磁界パルス18が発生される。然し、前に述べた様に、損失性構造との結合の為、並びに渦電流を誘起することによる擬似的な成分の為、実際には、得られる磁界勾配は20に示す様な有限の立上り時間及び22に示す様な有限の減衰を持つている。前に触れたが、こういう勾配の歪みは信号の損失並びに予期しない位相の分散を招くことがある。

本発明の1実施例では、第2B図に示す様に電流パルス14をプリエンファシス・フィルタ24に印加して、波形26で示す様に電流パルスを予め歪め、この結果勾配コイルに印加される増幅された電流パルス28が所望の矩形の勾配パル

ス18を発生する様にする事により、勾配の歪みを減少することが出来る。典型的なMRの用途では、勾配パルスがデカルト座標系の少なくとも各々の軸で印加されるから、本発明を実施する為のMR装置は、全ての軸に従つて補正を達成する為に、第2B図に示すのと機械的に同様な手段を持つている。然し、簡単の為、以下の説明では1つの軸だけに沿つた補正について説明する。

第2B図の電流パルス14をどの様に予め歪めるべきか、従つて所望の歪みを達成する為に、プリエンファシス・フィルタ24をどの様に修正すべきかを決定する為に、最初に除こうとする勾配の歪みの性質を測定して解析しなければならない。MR装置を用いてこういうことを達成するやり方を次に説明する。

第3A図は勾配がゼロでない様な、“0”と記した勾配の原点(即ちシステムのアイソセンタ)から距離“x”の所に配置されたMR作用を持つ物質、好便には約1ccの水を入れた小さなびんで構成されたサンプル30を示している。サ

ンプル 30 は、第 3 B 図に示すパルス順序を用いて勾配の歪みを調べる為に使われる NMR 信号の源として作用する。第 3 B 図は、例えば物体の x 軸に沿って印加された 1 個の勾配だけを示している。前に述べた様に、以下説明する方法が実際には、補償を必要とする勾配を印加するこの他の軸に対しても繰返される。

最初にこの発明の測定方法の根拠となる原理を直観的に説明しておくのが役立つと思われる。第 3 B 図に示す様に、勾配パルスの後、 90° RF パルスを印加し、これにより自由誘導減衰 (FID) 信号を発生させる。擬似的な勾配成分がなければ、サンプル物体は、FID の時間全体の間、一定の磁界内にある。その結果、FID の瞬時周波数は時間の関数として一定である。然し、第 3 B 図の破線で示す様に、勾配パルスの後に擬似的な成分が続く場合、サンプル物体に於ける磁界が FID の間に変化し、従つて FID 信号の瞬時周波数も変化する。第 3 B 図には、 90° RF パルスの直前に勾配パルスが印加されることを示

を持っていることが判る。本発明はこの情報を利用して、この測定された位相を用いて擬似的な勾配応答を特徴づける。別の目的は、測定された情報を使つて、勾配増幅器の電流波形を予め補償して、所望の勾配磁界が発生される様にするのである。この為、原則として、擬似的な勾配を特徴づける為に、時間の関数として FID 信号から位相を抽出しさえすればよい。然し、実際には、 B_0 の非均質性並びに勾配によつて誘起された非均質性の両方による位相の分散により、 T_2^* 減衰が、勾配の特性的な緩和時間よりずっと短くなることがある。この場合、 $G_x(t)$ 曲線の擬似的な成分を全部標準化する前に、FID 信号が減衰する。

T_2^* 減衰の結果として、第 3 B 図に示す様な 1 回の実験では、 T_2^* に相当する時間に対する勾配磁界しか特徴づけることが出来ない。 90° RF パルスが実質的に遅延なしに勾配パルスに続き、RF パルスに直ぐ続く時間 T_{AD} ミリ秒 ($T_{AD} \leq T^*$) の間、FID を測定すると仮定する。この測

定している。この結果得られる自由誘導減衰信号は位相情報を含んでおり、時刻 t に於けるその瞬時値は、RF パルスを印加してからの勾配の時間積分に關係する。

1 次元の密度分布 $P(x)$ (即ち、y 及び z 方向に対して積分したもの) 及びスピン-スピン緩和時間 $T_2(x)$ を持つサンプルから得られた FID 信号 $S(t)$ は次の様になる。

$$S(t) = \int P(x) e^{-t/T_2} e^{i r x \int_0^t G_x(t') dt' + i \Delta \omega t} dx \quad (1)$$

ここで r は磁気回転比、 $G_x(t)$ は関心のある勾配応答、 ω は一定の共振周波数のオフセットであり、これは後で詳しく説明する。物体が小さければ (物体の寸法の影響は後で説明する)、信号 $S(t)$ の位相は次の様になる。

$$\phi(t) = r x \int_0^t G_x(t') dt' + i \Delta \omega t \quad (2)$$

FID 信号の位相が勾配応答 $G_x(t)$ に関する情報

定によつて、電流パルスが遮断された後の最初の T_{AD} ミリ秒の間の勾配磁界が特徴づけられる。

次に RF パルスの印加を、勾配電流パルスが遮断されてから T_3 ミリ秒だけ遅延し、RF パルスの後の T_{AD} ミリ秒の間、FID を標準化すると仮定する。 $T_3 < T_{AD}$ であれば、この実験と前の ($T_3 = 0$ の場合の) 実験からのデータを組合せて、一層長い期間にわたつて勾配磁界を特徴づけることが出来る。擬似的な応答の全体を測定することが出来る様に、この過程を繰返すことが出来る。

この為、第 3 B 図の順序を第 4 A 図に示す様に変更して、勾配パルス及び RF パルスの間に可変の遅延時間 T_3 が入る様にする。収集の合間に、 T_3 を ΔT_3 T_{AD} だけ増減して、長さ $T_{AD} < T_3$ を持つ多数の短い収集を行なう。こうして、小さな重なり合うセグメントとして、 A/D 収集窓にわたつて擬似的な勾配の減衰全体を掃引することが出来る。1 形式では、第 4 B 図に示す様に、 T_{AD} を 10 ミリ秒に選び、セグメントの間の

遅延時間の変化はミリ秒にした。この場合、 A/D_1 、 A/D_2 等ば、擬似勾配応答曲線を標本化する時の隣合った重なり合うセグメントを表わす。この時位相曲線 22 全体が、第 4 B 図に示す別々の収集 34、35、36 を組合せることによつて得られる。

各々の収集からの位相データを解析する時、並びに種々の収集によつて得られたデータを組合せる過程で、 $\phi(i)$ (式(2)参照)が連続していることを利用する。即ち、任意の 1 つの時点に於ける位相は基数を 2π としてしか計算することが出来ないが、測定された位相のアンラッピング (unwrapping) により、 2π よりずっと大きな $\phi(i)$ を測定することが出来る。同様に、セグメントの境界で強制的に $\phi(i)$ を連続的にすることにより、種々のセグメントが組合される。境界でセグメントを更によく釣合せる為に、セグメントを幾分オーバーラップさせることが有利である。

こうすることにより、 T_s よりずっと長い時間区分にわたつて $\phi(i)$ を測定することが出来、こ

の時間区分は、擬似的な勾配の減衰を完全に特徴づけるに十分な長さである。その後、こういうデータの適当な解析により、例えば多重指数関数に分解するという形で所望の特徴づけが行なわれる。以下の説明は、この分解を更に完全に行なう為に使われる理論と回帰解析を説明する。

勾配のインパルス応答を $h(i)$ とする。測定したパラメータを回路部品の数値に換算するのが容易である為、並びにそれがよい近似になることが判つた為、勾配装置のインパルス応答を有限の数の指数関数項の和で近似するのが便利である。この為 $h(i)$ は次の様に定義する。

$$h(i) = \delta(i) + \sum_{k=1}^N g_k e^{-\lambda_k i} \quad (3)$$

ここで $\delta(i)$ はディラックのデルタ関数であり、 g_k 及び λ_k は k 番目の指数関数成分の振幅及び変換率定数である。このインパルス応答を励振関数と畳込み積分することにより、勾配の応答が得られる。矩形の励振パルスに対し、第 5 図に示す

時間パラメータの定義として、次の式が得られる。

$$G(i=0) = G_0 \sum_{k=1}^N a_k (-e^{-\lambda_k T_0}) \equiv G_0 \sum_{k=1}^N g_k \quad (4)$$

$$\text{但し } a_k = g_k / \lambda_k \quad (5)$$

は無次元の振幅係数である。式(4)は、それより前の勾配の励振から無限の時間が経過したという仮定の下に、勾配パルスの終りの直後の勾配の振幅を表わしている。励振が終了した後では、

$$G_x(i') = G_0 \sum_{k=1}^N g_k e^{-\lambda_k i'} \quad (6)$$

式(6)を式(2)に代入すると

$$\phi(i) = r G_0 \sum_{k=1}^N g_k r_k (-e^{-\lambda_k i}) + \Delta\omega i \quad (7)$$

ここで $r_k = \lambda_k^{-1}$ は緩和時間である。この為、サンプルの位置 x (第 3 A 図) とオフセット $\Delta\omega$ が判つていて、 $S(i)$ の測定から $\phi(i)$ が得られれば、これから説明する x 自乗最小化方法により、プリエンファシス・フィルタ 24 (第 2 B 図) を校正するのに必要な係数 a_k 及び λ_k を求めることが出来る。

オフセット位相 $\Delta\omega i$ は周波数合成器のオフセット並びに/又は磁界の非均質性によつて生ずる。この実施例では、第 5 図に示す様に、前の $G_x^+(i)$ 勾配パルスに較べて、反転した勾配の符号 $G_x^-(i)$ を用いた 2 回目の測定を行なうことにより、周波数 $\Delta\omega$ を決定する。この結果得られた信号 $S^+(i)$ 及び $S^-(i)$ は、記号 + 及び - の添字で示す様に、反対の位相を持っている。式(7)のオフセットによる位相は、勾配の符号を反転した時に符号を変えないので、2 回の測定値を減算した時、オフセット周波数成分が消える。これは、米国特許第 4443760 号に記載された方法と同様である。

次にサンプル 30 (第 3 A 図) の位置 x を M R を用いて測定するやり方を説明する。サンプルの位置は、第 6 図に示す様な、勾配を再構築したスピネコーのスペクトルから決定される。

第 6 図のパルス順序は第 5 図と同様であるが、 x を測定する為に使われる作像実験を含む点異なる。この実験は、最初に 90° RF 励振パルスを印加した後、スピネコー信号を発生する

反対の極性の勾配パルス40, 42を印加する。
勾配パルス42は例えば読取り勾配パルス(G_p
= 120 mg/cm)である。前に述べた様に、他の
軸(例えば y 及び z)に沿って勾配の補正を必要
とする場合、サンプルの位置(y 及び z)を測定
する為には、これらの軸に沿った同様な作像実験
が必要である。

第6図で、 G_p を読取り勾配の振幅とする。
その時、位置 x に於けるサンプルの周波数は

$$\omega_0 = \gamma G_p x + \Delta\omega \quad (8)$$

ここで $\Delta\omega$ は一定のオフセットである。半分の
ビュー(view)の G_p を真にし、前に説明した様
に両半分の走査の周波数を減算することにより、
オフセット周波数を除く。スペクトルの標準的
な閾値モーメント解析によつて周波数が判る。

幾何学的手法の代りに、スピネコーを用
いて x を測定する理由は、(1)勾配の原点(ゼ
ロ点)をみつけるのが困難であることがあること、
並びに(2)勾配が完全に直線的ではないことがあ
ること、特にビューの場の縁で直線的でないことが

式(4)で、 $\arg(S(t)) = \phi(t)$ であるから、サンプル
が有限であることによつて位相の測定値が歪まな
いことに注意されたい。任意の対称的な物体に
対してこの関係が成立することを証明することが
出来る。この為、サンプルが無限小でなくても、
対称的であれば、測定に誤差は生じない。

FIDの間の勾配を一定とすることにより、
変調効果を評価することが出来る。振幅の最初
のゼロは時刻 T_2^* で起る。この時、

$$\alpha \gamma G_0 \alpha T_2^* = \pi \quad (9)$$

この為、FIDの持続時間 T_2^* を A/D の窓の持続
時間に等しく定めることにより、勾配 G_0 の上限
が得られる。例えば、 $\alpha = 8^\circ$ 、 $T_2^* \geq 10$ ミリ
秒を希望する場合、 $G_0 \leq 200 \text{ メガガウス/cm}$ で
ある。

位相オフセットの補正及び x を決定した
後の最終的なデータの決定は

$$M(t) = \frac{\phi(t)}{\omega_0} \frac{G_p}{G_0} = \sum_k \alpha_k (-e^{-T_0^2 k}) r_k (-e^{-t^2 k}) \quad (10)$$

あるからである。この為、 x を計算するの
に磁気共鳴信号を使うことにより、 G_p の同じ誤
差により、 G_0 (第6図)に誤差があつても、そ
の誤差が補償される。比 G_p/G_0 だけが重要で
ある。

次に、有限の寸法を持つ物体を使う効果を説
明する。前に説明した様に、サンプルが無限小
でない場合、擬似的な勾配応答により、サンプル
30の幅にわたつて位相外れ(dephasing)が起る。
この影響は、FIDの持続時間を制限し、 $\phi(t)$ と
 $S(t)$ の位相の間の関係を変えることがあるとい
う点で、 T_2^* と同様である。

簡単の為、 x を中心として幅 $2a$ を持つ
矩形サンプルを仮定する。その時FIDは

$$S(t) = \frac{1}{2a} \int_{-a}^{+a} e^{i r x} \int_0^t G(t') dt' dx \quad (9)$$

又は

$$S(t) = e^{i \phi(t)} \text{sinc} \left[\phi(t) \frac{a}{x} \right] \quad (10)$$

即ち、 $S(t)$ がsinc関数によつて振幅変調される。

この為、次の展開式の係数 A_k 、 r_k を求める。

$$M(t_i) = \sum_k A_k (-e^{-t_i^2 k} / r_k), \quad i = 1 \dots N_m \quad (11)$$

ここで時刻 t_i に N_m 回の測定がある。

$$A_k \equiv \alpha_k (-e^{-T_0^2 k} / r_k) r_k \quad (12)$$

或る作像装置では、2つ又は3つの指数関数がデ
ータに非常によく合うことが判つた。他の用途
では、必要とする指数関数成分がこれより少なく
又は多いことがある。例えば後で述べるベビン
トン(Bevington)の著書に記載されている様に、
どれだけ多くの項目が必要かを決定する為に使わ
れる方式は、公知である。

擬似的な勾配応答を特徴づける為に、係数 A_k
及び r_k を計算しなければならない。妥当な方
式は、最小自乗のはめ合せ(又は x 自乗の最小化)
を行なうことである。式(11)から判る様に、合
せるべき式は、こういう係数に対して直線的では
ない。非直線的な x 自乗最小化の方法も周知で
ある。ベビントンの著書にはその幾つかの方法

が記載されている。次に特定の1つの作像装置からのデータにはめ合わせる為に使われる方法を説明する。2つ又は3つの指数関数項を合せることが出来る。

最初に、時定数が最も長い項に対する予備的なはめ合さを計算する。この予備的なはめ合せでは、第7A図に示す様に、後の方の時間に対するデータを使い、時定数が一番短い項を無視することが出来る様にする。短い時定数より大きな時間 t に対しては

$$M(t) \sim A_0 - A_N e^{-t/\tau_N} \quad (4)$$

であつて、 N は時定数が一番長い指数関数項であり、

$$A_0 = \sum_{k=1}^N A_k \quad (5)$$

普通の反復的な x 自乗最小化方法を用いて、 A_0 、 A_N 及び τ_N (式4)を計算する。係数 A_N 及び τ_N が、時定数が最も長い項に対する予備的なはめ合せとなる。次に、この一番長い項を、測定されたデータから減算する。

判る様に、このはめ合せは振幅係数に対して直線的であり、その為、簡単な線形最小自乗はめ合せを用い $N \times N$ 個の方程式の解を持つ。

役に立つことが判つた別の計算方法は、1969年にニューヨーク州のマックグロー・ヒル・ブック・カンパニから出版されたP. R. ベビントンの著書「物理化学に対するデータの縮小と誤差の解析」、第232頁乃至235頁に記載されている様に、1次微係数までの項だけを残して、初期の推測点の周りの x 自乗関数のテーラー展開を用い、マルカルト(Marquardt)の手順により、はめ合さを改善することである。初期の推測が妥当に接近していれば、この方法はかなりうまく行く。 $2N \times 2N$ 個の方程式の線形系が、標準的な数値行列反転方法によつて解かれる。ディジタル計算の精度は、2倍精度浮動小数点演算を用いた時でも、はめ合せの係数の精度を制限することがあることが判つた。はめ合せの精度を改善する為に、このマルカルトの手順によつて得られた時定数だけを残す。振幅係数は、前に述べ

$$M'(t) = M(t) - A_N (-e^{-t/\tau_N}) \approx \sum_{k=1}^{N-1} A_k (-e^{-t/\tau_k})$$

(7)

この修正データを使つて、時定数が2番目に長い項に対する予備的なはめ合せを行なう。この場合も、データの窓は、残りの項の影響を無視することが出来る様に選ばれる。このことが第7B図にグラフで示されている。上に述べたのと同様な手順を用いて、 A_{N-1} 及び τ_{N-1} を計算する。3つの時定数を考えている場合、第7C図に示す様に、次に短い項に対して、予備的なはめ合さを減算して係数を計算する過程を繰返す。

こうして、係数に対する予備的な値を計算する。更に処理を行なうことにより、特に全ての指数関数項に同時にはめ合せることにより、はめ合さを改善することが出来ることが判つた。簡単な1つの手順は、時定数(τ_k)を前の評価した値に固定しておいて、 x 自乗を最小にする様な振幅(A_k)の値を計算することである。式4から

た線形はめ合せ手順を用いて計算する。

この為、完全なはめ合せ手順は、(a)前の予備的なはめ合さを減算して、データの部分集合だけを使うことにより、各々の指数関数項に対する予備的なはめ合せを行ない、(b)時定数係数(τ_k)だけを残し、線形はめ合せ手順を用いて新しい振幅係数(A_k)を計算し、(c)それまでのはめ合せの結果を中心としたテーラー級数を用いて、 x 自乗式を展開し、 x 自乗を最小にする様に新しいはめ合せを計算し、(d)時定数係数(τ_k)だけを残し、線形はめ合せ手順を用いて新しい振幅係数(A_k)を計算することから成る。

x 自乗がもはや目立つて減少しなくなるまで、工程(c)及び(d)を繰返す。

前に掲げた式(7)は、この順序を実施する時まで、それまでのパルス以降、勾配応答が完全に回復していると仮定している。実際には、長い時定数 τ_k (即ち、勾配の間の隔たりの時間より)に比肩し得るか又はそれより長い τ_k を持つ成分については、こういうことが成立せず、次に説

明する様に、補正をしなければならない。

$k(t)$ を指数関数成分 ($N=3$) のモデルで作
り、第3成分 ($k=3$) だけが現在の効果が発生
する位に長い時定数を持つていと仮定する。
前に述べた正の勾配 $G_x^+(t)$ 及び負の勾配 $G_x^-(t)$ を用
いるから、第5図に示す様に、パルス順序には符
号が交互に変わる2つの成分がある。この順序
では、動的な平衡が出来上った後の正の勾配に就
く磁界は

$$G_x^+(t) = G_0(t) + G_0 G_3 \tau_3 e^{-\lambda_3 t} \\ \left(\sum_{n=0}^{\infty} e^{-\lambda_3 (nT_R + T_R)} - \sum_{n=0}^{\infty} e^{-\lambda_3 (nT_R + T_0)} \right) \quad (18)$$

ここで $G_0(t)$ は擬似的な成分のオーバーラップが
ない時の勾配 (式(7)) であり、この場合も、イン
パルス応答の第3の指数関数成分だけが、このオ
ーバーラップ効果が重要になる位に長いと仮定す
る。負のパルス $G_x^-(t)$ に就く擬似的な勾配に対
しても、同様な式が成立する。オフセットを補
正した合計の位相は、 $G_x^+(t)$ 及び $G_x^-(t)$ の間の差に

味は、デコンボリューション・フィルタ $k(t)=h$
(t)⁻¹ を最初に励振に適用した場合、正味の応答が
所望の励振に就くことである。この為、プリエ
ンファシス・フィルタはインパルス応答の逆とし
て得られる。これを計算する為、

$$h(t) = \delta(t) + \epsilon(t) \quad (19)$$

が誤差関数を $\epsilon(t)$ を定義するものとする。この
時、($h * k = \delta(t)$)、適当なフィルタが次の様に
なることを検証することが出来る。

$$k(t) = \delta(t) - \epsilon(t) + \epsilon * \epsilon(t) - \epsilon * \epsilon * \epsilon(t) + \dots \quad (20)$$

ここで $*$ は畳込み積分を表わす。 ϵ が $\alpha \sim$
5% 程度である場合、更に高次項 $\epsilon * \epsilon$ 等は無視
し得ることに注意されたい。第1項だけを残す
ことを選んだ。これは、その時、ノ実施例では、
プリエンファシス・フィルタが、振幅 α_k 及び時
定数 τ_k を持つ一連の第1次 RC 回路に丁度なる
からである。

第2図のプリエンファシス・フィルタ 24 の

比例するから、長い成分だけによる合計の位相は
(式(18)) から、

$$\phi_3(t) = \phi_{30} \frac{e^{-\lambda_3 T_R} - \frac{1}{2} (e^{-\lambda_3 T_A} + e^{-\lambda_3 T_B})}{1 - e^{-\lambda_3 T_R}} \quad (19)$$

ここで ϕ_{30} は $k=3$ に対し、式(7)によつて表わさ
れる無限大の T_R 位相である。後で証明する様
に、 α_3 が ϕ_3 に比例するから、補正された α_3 は
次の様になる。

$$\alpha_3 = \alpha_3(\text{meas}) \left(1 + \frac{e^{-\lambda_3 T_R} - \frac{1}{2} (e^{-\lambda_3 T_A} + e^{-\lambda_3 T_B})}{1 - e^{-\lambda_3 T_R}} \right) \quad (20)$$

ここで $\alpha_3(\text{meas})$ は補正されていない測定値であ
る。

一旦上に述べた様にしてインパルス応答の係
数が決定されたら、次に説明する様に、デコンボ
リューション (プリエンファシス) フィルタを決
定することが出来る。

式(3)によつて表わされるインパルス応答の意

様なノ実施例のプリエンファシス・フィルタの回
路図が第8図に示されている。フィルタは、演
算増幅器 80 とフィルタ部品 82, 83, 84 で構
成されている。予め歪めた出力が、勾配コイル
を付勢する為に、勾配増幅器 (例えば第2B図の
130) に印加される。演算増幅器の入力が、入
力抵抗 R_0 及びノ又は更に多くの並列接続され
た RC 回路 82 乃至 84 を介して、電流パルスに
よつて付勢される。RC 回路の数は、勾配パル
スの補償を達成する為に、電流入力 14 に加える
べきプリエンファシスの所望の精度に関係する。
破線 86a, 86b は、必要に応じて別の RC 回路を
追加してもよいことを示す。各々の RC 回路は
入力のコデンサ (例えば C_1) を出力可変抵抗
(例えば R_1) と直列に接続して構成される。
コデンサと可変抵抗の間の共通点が第2の可変
抵抗 (例えば R_2) を介して大地に接続される。
第8図に示す回路は (3つの RC 回路があるから
) 3 指数関数による補正を行なう。或る用途で
は、2つの RC 回路によつて適切な補正 (プリエ

ンファシス)が行なわれることが判つた。

係数を計算した後、RC回路の可変抵抗(例えば R1 乃至 R6)の抵抗値を設定することが出来る。原則的には、フィルタ 24 の応答が回路の計算によつて完全にモデル化されていれば、測定された応答は完全に補償される。勿論、実際には、コンデンサの部品の許容公差により、理想からの幾分のずれが生ずることがある。この場合、反復的な補正工程を使うことが出来る。その時、補正後の測定された応答を、前の時定数を用いた新しい一組の指数関数にはめ合せ、その結果各々の成分に対して生じた誤差の振幅を前の値に加算する。この反復的な方法は繰返すことが出来るが、場合には、繰返しを全く必要としないことが判つた。

指数関数形プリエンファシス・フィルタを用いるこの発明のノ実施例を説明したが、当業者であれば、(能動形フィルタの設計の様な)この他のフィルタの形式を工夫することが出来ることが理解されよう。更に、減衰する擬似的な成分の

$w(t_k)$ からの計算により、実時間に近い形で実施することが出来る。

本発明を特定の実施例及び例について説明したが、以上の説明から、当業者にはこの他の変更が考えられよう。従つて、特許請求の範囲内で、本発明はこゝに具体的に説明した以外の形で実施し得ることを承知されたい。

4 図面の簡単な説明

第1図は MR 装置のノ例の主な部品を示すブロック図、第2A図は普通の勾配増幅器及び勾配コイルを詳しく示すブロック図、第2B図は本発明のノ実施例に従つて、勾配増幅器の前にプリエンファシス・フィルタを入れた、勾配増幅器とコイルのチェーンを示すブロック図、第3A図は MR 装置のアイソセンタから離して配置したサンプルを示す線図、第3B図はノつの軸に沿った勾配パルスの擬似的な成分を測定する本発明のノ例のパルス順序を示す時間線図、第4A図及び第4B図は第3B図と同様な線図であるが、擬似的な勾配応答を測定するのに適した本発明のパルス順序

測定の後、プリエンファシス・フィルタの力を借りずに、ソフトウェア方法を用いて、勾配コイルを付勢する信号のプリエンファシス(又は予め歪めること)を達成することが出来る。

この様なソフトウェア方法では、例えば一旦式(2)を用いて $k(t)$ がみつかったら、勾配波形を勾配増幅器に印加する前に、勾配波形を発生する為に使われるデータにそれを数値畳込み積分方法によつて適用することが出来る。

即ち、 $w(t)_k$ を特定の軸に沿つて印加すべき勾配に対する所望の勾配波形とする。その時、補正すべき実際の応答に対して勾配増幅器に印加しなければならない補正済み波形は次の様になる。

$$w_c(t_k) = \sum_{j=1}^N w(t_{k-j}) \cdot k(t_j) \quad (2)$$

こゝで N は標本化したフィルタの後 k にある点の数を表す。この動作は、波形を読取メモリに貯蔵する前に(第1図の計算機 101 の様な)計算機によつて実施してもよいし、或いは貯蔵した波

を示す時間線図、第5図は第3B図と同様な線図であるが、正及び負の勾配パルスを示す時間線図、第6図はサンプルの位置を測定すると共に、ノつの軸に沿った勾配パルスの擬似的な成分を測定する為の好ましい実施例のパルス順序を示す時間線図、第7図は回帰解析を行なう為の種々のデータ曲線を示すグラフ、第8図はノ実施例のプリエンファシス・フィルタの回路図である。

特許出願人ゼネラル・エレクトリック・カンパニー
代理人 (7630) 生沼徳二

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☒ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☒ FADED TEXT OR DRAWING
- ☐ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☐ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.